文章编号： 1007-4627(2024) 03-0001-06

基于 $LaBr_3$ 全国产化 γ 能谱仪性能研究

吴会寅[1]，陈 源[1]，刘毅娜[2]，张 毅[3]，周嘉禾[3]

(1. 重庆建安仪器有限责任公司，重庆 400060；
2. 中国原子能科学研究院计量与校准技术国防科技重点实验室，北京 102413；
3. 兰州大学核科学与技术学院，兰州 730000)

摘要： 随着国内半导体企业技术的发展，部分国产元器件性能指标已经与进口元器件相当，能够满足核辐射监测仪器仪表的性能需求。论文基于 1.5 英寸 $LaBr_3$ 闪烁体设计了一套全国产化的 γ 能谱仪，包括闪烁体、光电倍增管和电子元器件均选用国产厂家产品。经测试，能谱仪在常温下的分辨率可以达到 2.8%@662*keV*。工作温度范围可达-40℃ 至 50℃，且全温度范围内的能量分辨率均优于 3.0%，^{137}Cs 全能峰道址随温度变化率约为-0.67/℃，且线性度良好。高压调整率为 0.02*V*，满足 0.2*V*/℃ 的稳谱高压调整率要求。谱仪的能量非线性好于 99.99%。实验数据显示，现阶段国产 $LaBr_3$ 闪烁体、光电倍增管及电子元器件能够满足 γ 能谱仪的设计需求。

关键词： γ 谱仪；$LaBr_3$；全国产化；高低温

中图分类号： TL812+.1 **文献标志码：** A **DOI：** 10.11804/NuclPhysRev.32.01.01

引言

近些年，随着国内消费电子市场火爆，国内一批优秀的半导体企业发展迅猛[1-2]，国内企业设计生产的中低端芯片市场占据份额越来越大。核辐射监测仪器仪表所设计的电子元器件例如 DC-DC 芯片、LDO 芯片、运算放大器、高速模数转换器（ADC）、低速 ADC、低速数模转化器（DAC）和现场可编程逻辑门阵列（FPGA）芯片等，国内厂家均可以实现自主研发和生产，且性能指标与进口元器件相当。

核辐射监测仪器仪表按技术难度可分为计数型、能谱型和成像型[3-5]。γ 能谱仪作为核辐射监测领域中的中端产品，其技术难度及其对元器件的性能要求要高于传统的计数类设备。γ 能谱仪主要用于监测环境中的 γ 射线能量和计数，通过分析能谱，可以识别环境中的放射 γ 射线的核素。同时根据 γ 能谱仪的计数率、能谱数据对应的 GM 函数计算可以获取周边环境的剂量率水平[6]。基于 $LaBr_3$ 闪烁体的 γ 能谱仪由于其能量分辨好、密度大等优点，这些年作为探头被广泛的应用于 γ 能谱仪中。γ 能谱仪常以便携式方式使用，经常面临严酷的野外环境，因此对设备的温度适应性提出了极高的要求。设备需要在极宽的温度范围内（-40℃ 到 50℃）保证能量分辨不低于 3.0%，以不降低设备的核素识别成功率。ORTEC 公司的 1.5 英寸的 $LaBr_3$ 的能量分辨可以 3.0%@662*keV*[7]，Mirion 公司的同类产品推荐的工作温度为 4℃ 到 43℃[8]，无法满足野外工作温度需求。近些年，军用和核电领域设备的的国产化率提出了严格的要求。因此，本工作研制了一款 100% 国产化的 1.5 英寸的溴化镧谱仪，力求能量分辨率好于 3.0%@662*keV*，且工作温度可以达到适合野外作业的-40℃ 到 50℃ 。

能谱型设备的核心电子元器件为高速 ADC 和 FPGA 芯片。近些年，随着国内半导体技术的发展，国内可以研发生产高速 ADC 的企业包括但不限于上海贝岭、苏州云芯、上海炽芯科技等公司。国产 FPGA 厂家包括但不限于上海复旦微电子、安路科技、广州高云和紫光同创等公司。北京玻璃研究院和河北省华凯龙科技有限公司可以生产能量分辨好于 3.0%@662*keV* 的 1.5 英寸 $LaBr_3$ 晶体。北方夜视技术股份有限公司所设计生产的一些光电倍增管性能指标与北京滨松相当。能谱仪其他的周边元器件例如电源芯片、高压模块和存储芯片等国内均有性能良好的产品可以进行选择。

1 工作原理及电路设计

$LaBr_3$ 闪烁体探测器的工作原理见图 1所示。当 γ 射线进入闪烁体后，产生次级电子，该电子使闪烁体分子电离和激发，退激时发出大量光子[9]。包裹在闪烁体周边的

收稿日期： 2024-01-15； **修改日期：** 2024-01-15
基金项目： 国家自然科学基金资助项目 (U2032166, 11875301, U1832167)；国家重点研发计划 (2022YFE010390)
作者简介： 吴会寅 (1989–)，男，河北石家庄人，副高级工程师，博士，从事核探测应用；E-mail: wuhy418@aliyun.com
通信作者： E-mail: zhoujiahe21@lzu.edu.cn

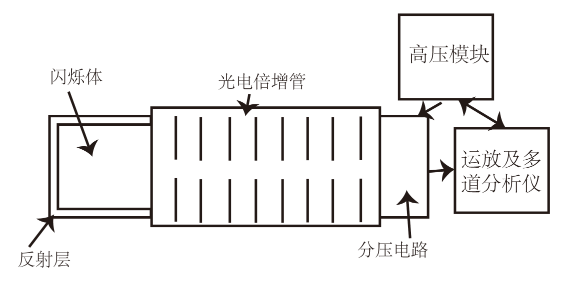


图 1 $LaBr_3$ 闪烁体探测器工作原理示意图

反射物质将光子聚集向光电倍增管，光电倍增管光阴极将光子转化为电子，这些电子将被光电倍增管倍增[10]。倍增后的电子经过 RC 运放电路转化为类指数衰减信号，多道分析电路获取并分析该信号得到该信号的能量，累计一定时间便可以得到能谱数据。$LaBr_3$ 闪烁体采用北京玻璃研究院生产的 1.5 英寸圆柱形型闪烁体[11]，光电倍增管采用北方夜视的 N4022 型光电倍增管，该光电倍增管对标滨松公司的 R6231-100 型光电倍增管。闪烁体和光电倍增管使用光导封装在一起，为降低地磁影响使用坡莫合金对光电倍增管单独屏蔽[12]。$LaBr_3$ 设备实物图如图 2所示。



图 2 $LaBr_3$ 探测器实物图

电子学由三个印制板组成，分别是高压分压电路板、多道分析板和高压控制板，电子学的原理框体如图 3所示，图中框 a 为高压控制板原理框图，框 b 为高压分压板原理框图，框 c 为多道分析板原理框图。

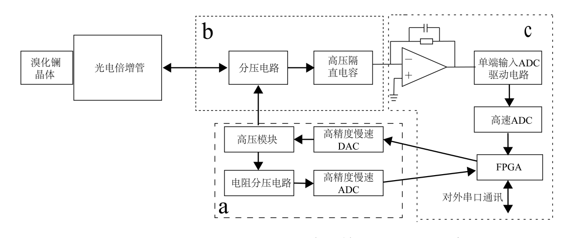


图 3 $LaBr_3$ 能谱仪电子学框图

a) 高压控制板主要用于设置高压输出和获取高压输出电压值[13]。高压模块采用东文高压生产的最大输出 1250V、最大负载 0.5mA 的全国产化高压，能谱仪采用 16 位高精度 DAC 对高压输出进行设置,选用的芯片型号为圣邦微 SGM5353-16，该芯片的输出噪声为 0.15uV_{pp}。同时使用圣邦微的 SGM58031 慢速 ADC 监测高压输出，由于该芯片最大电压输入范围为 2.048V，因此需要使用多个高阻值电阻进行分压和一个低阻值电阻对输出的高压进行分压, 使低阻值电阻在高压模块输出最大电压为 1250V 时的电压值为 2V。通过监测低阻值电阻的电压值便可计算出高压输出值。

b) 高压分压电路板用于将输出电压进行分压以满足光电倍增管的工作需求[14]。为提高光电倍增管的线性，采用晶体管替代后级分压电阻的设计。设备采用正高压供电，最终从 P 级经高压隔离电容引出电荷信号，为提高抗干扰能力采用同轴对插件将分压板信号传送给多道板；

c) 多道分析板用于获取高压分压板的电荷信号、处理并获取能谱及控制高压模块。分压板电荷信号经电压型放大器后进入 ADC 驱动电路，其中电容和电阻值的乘积为信号的指数衰减时间。ADC 芯片对输入信号进行采样，FPGA 获取 ADC 的采样值经流水线处理后记录该次信号的峰峰值，该峰峰值即为该次事件对应的能量值[14]。累计 1 秒钟信号后将能谱数据发生至上位机。

能谱仪中 FPGA[15] 采用高云半导体科技的晨熙系列 GW2A-18 型 FPGA，该款芯片具有 20736 个 LUT4, 满足能谱仪信号处理所需要的资源，该芯片最大运行速度 160MHz, 大于 ADC 运行的 100MHz 速度。核电压为 1.0V，可以实现低功耗运行[16]。ADC 芯片采用苏州云芯的 YA16S105 型 16 位高速并口 ADC，该芯片最高可运行在 105MHz, 与 ADI 公司的 AD9265 芯片可实现 Pin-Pin 替换, 芯片的失调误差为 ±0.4%FSR，增益误差为 ±0.8%FSR, 微分非线性为 ±0.75LSB，积分非线性为 ±3.5LSB，其整体性能指标与 AD9265 芯片持平。由于国内没有单端转差分芯片作 ADC 的驱动芯片，因此能谱仪采用电阻电容组合的单端输入作为 ADC 的驱动电路。该驱动电路虽然降低了无杂散动态范围，但是通过选择合适的电阻值和电容值选择可以使其对信号的信噪比影响变的很小。

FPGA 芯片获取 ADC 的采样值并以流水线处理方式，采用梯形成型算法对输入的类指数衰减波形就行滤波成型以减小原始信号的噪声[17-18]。图 4是能谱仪采集的一个典型的脉冲信号，图中黑色曲线为 ADC 采集的原始信号，原始信号波形为类指数衰减型。红色曲线是将该波形进行梯形成型后的波形。从图 4中可以见到，梯形成型后的噪声水平好于原始波形，使用梯形成型的峰峰值代替原始波形的峰峰值可以进一步优化能量分辨率[19-20]。

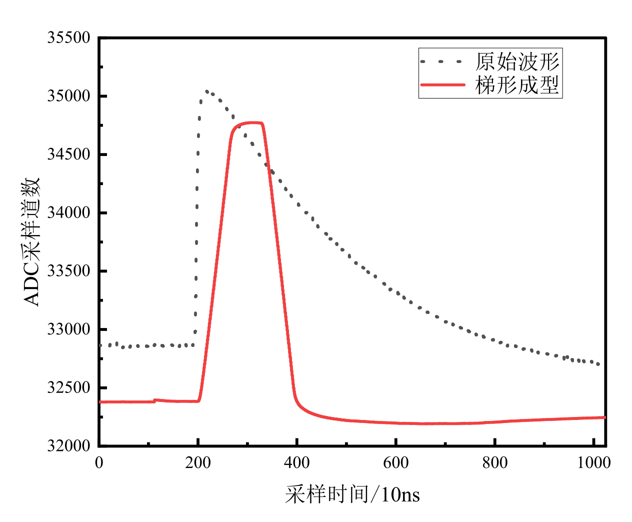


图 4　(在线彩图)ADC 采集一个典型的 γ 信号波形（黑色）和 FPGA 梯形成型后的波形（红色）

2　测试结果及分析

2.1　基本功耗测试

能谱仪在室温（23℃）下，使用低压开关电源和放射源对能谱仪进行基本性能测试。能谱仪采用 5V 直流供电，光电倍增管高压设置为 452.5V，仪器总的工作电流约为 190mA，总体功耗约为 0.95W。

2.2　本底能谱

能谱仪在室温（23℃），实验室内进行本底测量，本底能谱见图 5所示。图中 ^{138}La 发射的 1435.8$keV\gamma$ 射线和天然本底 ^{40}K 发射的 1460.8$keV\gamma$ 射线重叠在一起，大约对应道址为 500 道左右[21]。该探头的自发放射性与天然本底 ^{40}K 计数率接近，而 ^{40}K 峰通常适用于无源稳谱使用，过高的 ^{138}La 本底将影响稳谱的准确性，同时较高的本底会影响测量本底下限。

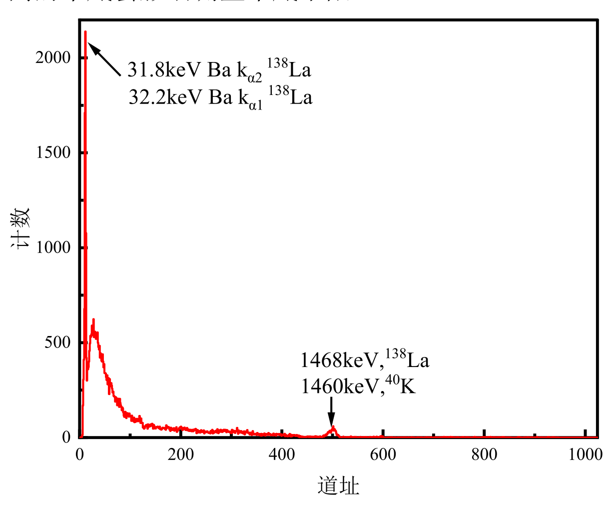


图 5　常温下设备测量本底能谱图

2.3　能量分辨测试

使用 ^{137}Cs 标准源进行能量分辨测试，放射源的 γ 能谱见图 6所示。图中横坐标为道址，总道数为 1024 道，最大道数对应的 γ 射线能量约为 3MeV。图中 ^{137}Cs 的 661.7keV 全能峰对应的道址为 227 道，半高宽为 6.28，能量分辨率约为 2.8%。

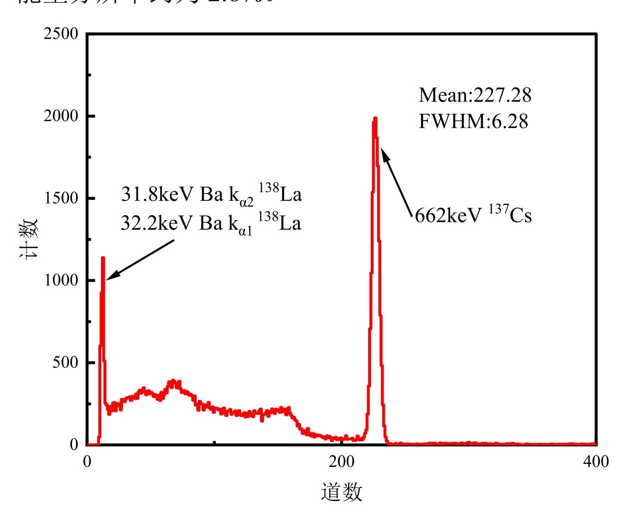


图 6　常温下设备测量 ^{137}Cs 的能谱图

2.4　能量非线性测量

能谱仪在常温下进行测试，且测试期间能谱仪的高压值保持不变。将 ^{137}Cs 标准源、^{60}Co 标准源和 ^{241}Am 标准源放置在离设备合适的距离处，使得能谱计数率在 1000cps 左右，减少设备死时间的影响。三个放射源的 γ 能谱见图 7所示。图中黑色曲线为 ^{241}Am 的 γ 能谱，红

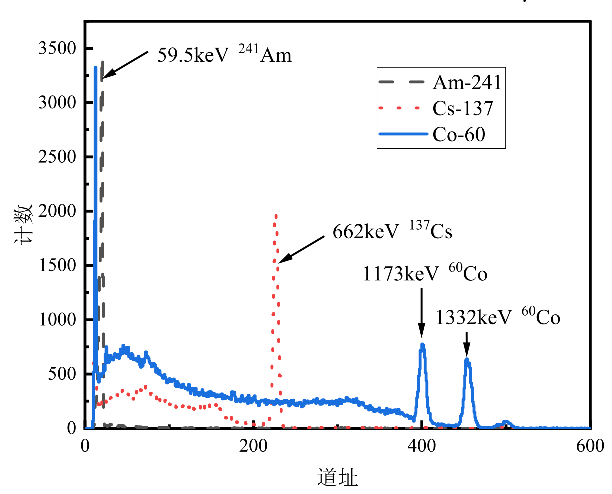


图 7　(在线彩图) 常温下设备测量 ^{241}Am（黑色）、^{137}Cs（红色）、^{60}Co（蓝色）的能谱图

色为 ^{137}Cs 的 γ 能谱，蓝色为 ^{60}Co 的 γ 能谱。使用高斯公式对全能峰进行拟合，得到三个能谱的四个全能峰对应的道址[22]。通过对能量和道址进行线性拟合得到设备

的能量非线性不大于 0.01%，拟合结果见图 8所示。

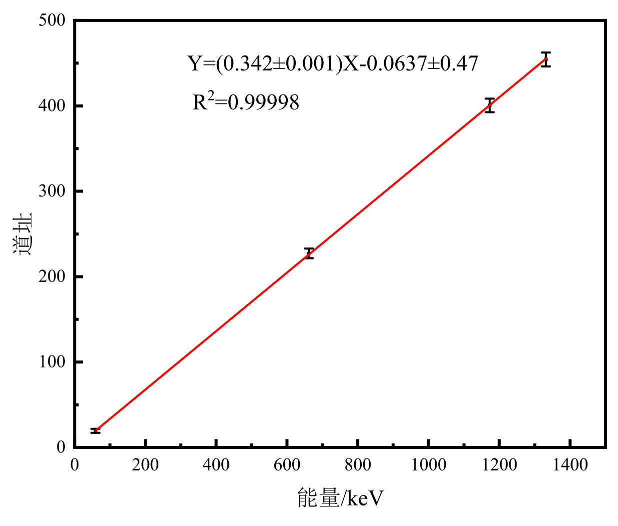


图 8　γ 谱仪线性拟合结果

2.5　高低温性能测试

能谱仪作为可以随身携带的小型化能谱测量设备，合适在野外进行空间环境能谱测量。能谱仪需要工作在较宽的温度范围内，因此需要测试能谱仪在高低温环境下能否正常工作。在实验室中，利用 ^{137}Cs 放射源和高低温对能谱仪进行温度响应实验。将能谱仪和 ^{137}Cs 放射源放置在高低温箱内，低压电源和计算机放置在高低温箱外。高低温箱以 10℃ 每小时的速率变化，达到预定温度后保持不变 2 个小时。实验时能谱仪处于断电状态，当温度到达预设温度后再通电进行测量，同时每次测量的工作电压不变。不同温度下 ^{137}Cs 的全能峰对应的道址如图 9所示。从图中可见，^{137}Cs 的全能峰道址随着温度的升高而降低，且呈现很好的线性变化[23]。通过线性拟合得到道址变化率约为-0.67/℃。图 10展示的是

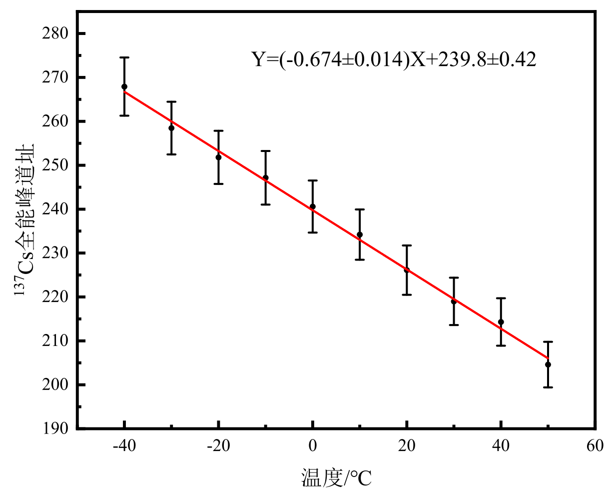


图 9　^{137}Cs 全能峰道址与温度对应关系

对 γ 能谱进行稳谱后（将 ^{137}Cs 的全能峰对应的道址调整至 226 道），高压模块的工作电压和温度的关系图。从图中可以看到，高压值随着温度呈线性增加，经线性拟合得到高压变化值约为 0.2*V*/℃ 。能谱仪使用的是 16 位数模转化器（DAC）对高压模块进行控制，高压模块最大输出电压为 *1250V*，DAC 调节精度为 0.019*V*，该精度远高于温度变化 1℃ 所需要调整的电压值。利用能谱仪自带的温度传感器，能谱仪可以通过调整高压方式进行实时稳谱。图 11展示的是不同温度下（稳谱完成后）^{137}Cs

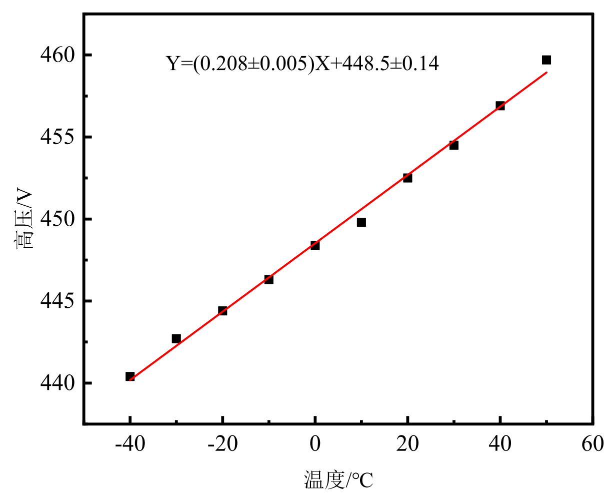


图 10　稳谱后不同温度下高压模块的电压值

的 662*keV* 全能峰的能量分辨率。实验数据显示，能谱仪在-40℃ 到 50℃ 的能量分辨率均小于 3.0%。能量分辨率整体随着温度的升高而降低，是因为光电倍增管的噪声和电子学热噪声均随着温度的升高而变大[24]，同时随着温度的增加，闪烁体光产额也在下降。

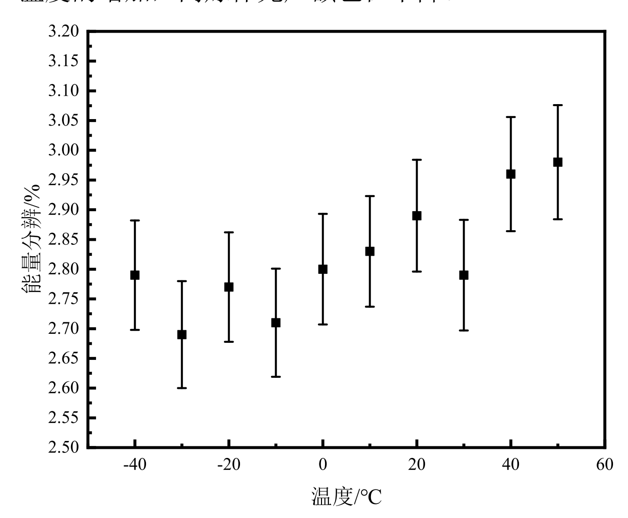


图 11　温度与 ^{137}Cs 全能峰能量分辨率的关系图

3 结论

采用全国产电子元器件、国产 1.5 英寸 $LaBr_3$ 闪烁体及国产光电倍增管的 γ 能谱仪的在-40℃ 到 50℃ 温度范围内，其能量分辨率均好于 3.0%, 该性能指标满足室内和野外极端温度环境使用。Mirion 公司的 LABR-1.5x1.5 型 $LaBr_3$ 能谱仪的能量分辨为 3.0%, 且标称的工作温度范围为 4℃ 到 43℃[8]，全国产化的能谱仪的能量分辨和工作温度范围均优于进口设备。

综上，随着国内半导体行业的发展，核辐射监测仪器仪表领域的 γ 能谱型设备可以实现全面国产化设计，且基本性能优于类似进口产品。

参考文献

[1] KE Jianbo. Electronics Process Technology, 2021, 242(05):249-254.(in Chinese)
(柯建波. 电子工艺技术, 2021, 242(05):249-254. DOI:10.14176/j.issn.1001-3474.2021.0)

[2] MA Fengjiao. Trade Fair Economy, 2022, (04):69-74.(in Chinese)
(马凤娇. 商展经济, 2022, (04):69-74. DOI:10.19995/j.cnki.CN10-1617/F7.2022.04.069)

[3] GAO Yan, ZENG Guoqiang, GUI Min, et al. Nuclear Techniques, 2019, 42(06): 34-38.(in Chinese)
(高妍, 曾国强, 顾民, 等. 核技术, 2019, 42(06):34-38. DOI:10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.060401)

[4] SUN Chao, RAO Kaiyou, GUO Jingfu. Nuclear Eletronics & Detection Technology, 2014, 34(08): 1020-1023.(in Chinese)
(姚永刚, 邓长明, 倪邦发. 核电子学与探测技术,2014, 34(08): 1020-1023. DOI:JournalArticle/5b435c50c095d716a4c818a7)

[5] WANG Xi, XIAO Shali, ZHANG Liuqiang, High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(10): 2448-2452.(in Chinese)
(王玺, 肖沙里, 张流强, 等. 强激光与粒子束, 2010, 22(10): 2448-2452. DOI:10.3788/HPLPB20102210.2448)

[6] LAI Wanchang, LIU Yanfang, TANG Lili, et al. Nuclear Techniques, 2011, 34(09): 679-682.(in Chinese)
(赖万昌, 刘艳芳, 唐丽丽, 等. 核技术, 2011, 34(09): 679-682. DOI:CNKI:SUN:HJSU.0.2011-09-008)

[7] [EB/OL]. https://www.ortec-online.com.cn.

[8] [EB/OL]. https://www.mirion.com.

[9] HU Wanping, ZHANG Guiyu, ZHANG Yunlong, et al. Nuclear Techniques, 2023, 46(06): 41-54.(in Chinese)
(胡万平, 张贵宇, 张云龙, 等. 核技术,2023, 46(06): 41-54. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.060401)

[10] ZHANG Yu, WANG Zhimin, ZHANG Haiqiong, Nuclear Eletronics & Detection Technology, 2021, 41(05): 885-891.(in Chinese)
(张宇, 王志民, 张海琼. 核电子学与探测技术,2021, 41(05): 885-891.)

[11] LI Yan, WANG Chuan, LIU Liye, et al. Nuclear Techniques, 2022, 45(07): 53-58.(in Chinese)
(李岩, 王川, 刘立业, 等. 核技术,2022, 45(07): 53-58. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070401)

[12] DING Kaiqi, LIU Jia, HUANG Weiping, et al. Nuclear Eletronics & Detection Technology, 2011,31(04):386-390.(in Chinese)
(丁凯奇, 刘佳, 黄卫平, 等. 核电子学与探测技术,2011, 31(04): 386-390.)

[13] WANG Jing, ZHANG Yanxia, TIAN Geng, et al, Nuclear Eletronics & Detection Technology, 2015, 35(09): 921-925.(in Chinese)
(王晶, 张雁霞, 田耕, 等. 核电子学与探测技术,2015, 35(09): 921-925. DOI:10.3969/j.issn.0258-0934.2015.09.018)

[14] HAN Hetong, LIU Junhong, LI Xianyou, et al, Nuclear Eletronics & Detection Technology, 2008, (02): 394-398. (in Chinese)
(韩和同, 刘君红, 李宪优, 等. 核电子学与探测技术,2008(02): 394-398. DOI:10.3969/j.issn.0258-0934.2008.02.044)

[15] HUANG Tuchen, GONG Hui, SHAO Beibei. Atomic Energy Science And Technology, 2013,47(11):2172-2176.(in Chinese)
(黄土琛, 宫辉, 邵贝贝. 核原子能科学技术,2013, 47(11): 2172-2176. DOI:10.7538/yzk.2013.47.11.2172)

[16] CHEN Xiaomeng, ZHANG Yuzhong, AI Xuanyun, et al. Nuclear Techniques, 2015, 38(05): 47-52.(in Chinese)
(陈小猛, 张羽中, 艾宪芸等. 核技术,2015, 38(105): 47-52. DOI:10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.050401)

[17] GAO Song, WANG Yin,GAO Songsong. Nuclear Eletronics & Detection Technology, 2012, 32(11): 1289-1292.(in Chinese)
(高嵩, 王颖, 高松松, 等. 核电子学与探测技术,2012, 32(11): 1289-1292.)

[18] XIAO Wuyun, WEI Yixiang AI Xianyun, Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2005,(06): 810-812.(in Chinese)
(肖无云, 魏义祥, 艾宪芸. 清华大学学报 (自然科学版),2005,(06): 810-812.)

[19] SUN Chao, RAO Kaiyou, GUO Jingfu. Nuclear Eletronics & Detection Technology, 2017, 37(07): 752-756.(in Chinese)
(孙超, 饶开友, 郭景富, 等. 核电子学与探测技术,2017, 37(07): 752-756.)

[20] CHEN Yanli, TAN Xinjian, LU Yi, et al, MODERN APPLIED PHYSICS, 2018, 9(03): 81-85.(in Chinese)
(陈彦丽, 谭新建, 卢毅, 等. 现代应用物理,2018, 9(03): 81-85. DOI:10.12061/j.issn.2095-6223.2018.031202)

[21] Cheng Hao,Sun Baohua, Zhu Lihua, et al.
NUCL SCI TECH, 2020, 31(99): 1098-1101. DOI:https://doi.org/10.1007/s41365-020-00812-8

[22] ZHANG Jianhua, CHUN Chengsheng, Zengjun, et al. Nuclear Techniques, 2013, 36(03): 27-30.(in Chinese)
(章剑华, 储诚胜, 曾军, 等. 核技术,2013, 36(03): 27-30)

[23] ZHANG Yan, LUO Min, Nuclear Eletronics & Detection Technology, 2013, 33(02): 188-190.(in Chinese)
(张燕, 罗明. 核电子学与探测技术,2013,33(02):188-190.)

[24] GUO Congliang, ZENG Dan, LI Jie, et al, Nuclear Eletronics & Detection Technology, 2004, (02): 117-120+131.(in Chinese)
(郭从良, 曾丹, 李杰, 等. 核电子学与探测技术,2014, (04): 117-120+131.)

Study of the performance of the localization production of $LaBr_3$ γ energy spectrometer

WU Huiyin[1], CHEN Yuan[1], LIU Yina[2], ZHANG Yi[3], ZHOU Jiahe[3]

(*1. Chongqing Jianan Instruments Co., Ltd., Chongqing 400060, China;*
2. National Key Laboratory for Metrology and Calibration Techniques, China lnstitute of Atomic Energy, Bejing 102413, China;
3. School of Nuclear Science and Technology, University of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract: With the development of domestic semiconductor enterprise technology, some domestic components performance indicators have been comparable to imported components, to meet the performance needs of nuclear radiation monitoring instrumentation. A fully localized γ energy spectrometer based on a 1.5-inch $LaBr_3$ scintillator, including scintillators, photomultiplier tubes, and electronic components, has been designed by using products of domestic manufacturers.The test results show that the resolution of the spectrometer can reach 2.8%@662keV at room temperature, the working temperature range can reach -40℃ to 50℃ , and the energy resolution is better than 3.0% in the whole temperature range, and the change rate of the all-around peak channel address of ^{137}Cs with temperature is about -0.67/℃ , and the linearity is good. The high-voltage adjustment rate is 0.02V, which meets the requirement of 0.2V/℃ for the stable spectrum. The energy nonlinearity of the spectrometer is better than 0.01%. The experimental data show that the domestic $LaBr_3$ scintillator, photomultiplier tube and electronic components can meet the design requirements of γ energy spectrometer.

Key words: γ spectrometer; $LaBr_3$; localization; High and low temperature

Received date: 15 Jan. 2024; **Revised date:** 15 Jan. 2024

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.,U2032166, 11875301, U1832167); National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFE0103900)

Corresponding author: ZHOU Jiahe, E-mail: zhoujiahe21@lzu.edu.cn